

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE METANO EM ATERRO EXPERIMENTAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA MURIBECA/PE – BRASIL

* Régia Lúcia Lopes¹
Felipe Jucá Maciel²
José Fernando Thomé Jucá²

EVALUATION OF METHANE EMISSIONS FROM AN EXPERIMENTAL
LANDFILL OF SOLID WASTE IN MURIBECA /PE-BRAZIL

Recibido el 24 de agosto de 2011; Aceptado el 6 de marzo de 2012

Abstract

The landfill gas (LFG) generated in Municipal Solid Waste (MSW) landfills can be emitted to the atmosphere through the gas collection system or by its escape through the final cover layer. The objective of this paper is to present the preliminary results of the methane (CH₄) superficial emissions investigation at three different cover layers in an experimental cell, located at Muribeca Landfill, Recife/PE. The static flux chamber methodology was used in order to evaluate CH₄ emissions "in situ", which was associated with laboratory tests for soil characterization. Eight flux chamber tests for measuring CH₄ emission, as well as four tests for biogas concentrations along the cover layer depth were done to evaluate CH₄ retention and/or oxidation. They were performed from September to December/2008. The CH₄ flux in the capillary cover layer (BAC) was 0.37 NI/m².h, in the methanotrophic layer (MET) was 1.90 NI/m².h, and in the conventional layer (CONV) was 4.97 NI/m².h. The lowest CH₄ flux determined in the BAC layer was related to the gas distribution layer at the bottom of this cover that equalized gas pressure and concentration before its passage through the soil. It was also verified that CH₄ volumetric concentration and the relation CO₂/CH₄ increased from the bottom to the top of all cover layers. This behavior was more accentuated at the methanotrophic layer, which was an indication of CH₄ oxidation. The study of alternative cover layers and its physical-chemical and constructive properties to reduce CH₄ emissions and prevent pollution to the atmosphere is extremely important for most small and medium sized landfills in Brazil, where the recovery of LFG is incipient and unviable.

Key Words: solid waste, landfill, biogas, final cover layer.

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

² Grupo de Resíduos Sólidos, Universidade Federal de Pernambuco

*Autor correspondente: IFRN, Campus Natal Central. Diretoria Acadêmica de Recursos Naturais. Av Sen. Salgado Filho, 1555 - Lagoa Nova - Natal/RN – CEP. 59.015-000. Email: regia.lopes@ifrn.edu.br

Resumo

O biogás gerado em aterros de resíduos sólidos urbanos (RSU) pode ser emitido para atmosfera através dos sistemas de coleta ou do fluxo na camada de cobertura final. Este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados preliminares das emissões de metano (CH_4) em três configurações de camada de cobertura que foram construídas em uma célula experimental de RSU, localizada no Aterro da Muribeca, Recife/PE-Brasil. A metodologia utilizada para medição de emissões de CH_4 foi a da placa de fluxo estática em ensaios de campo, utilizando-se também de ensaios em laboratório para a caracterização do solo. O trabalho foi realizado nos meses de setembro a dezembro de 2008, através de 8 ensaios de placa de fluxo em cada camada, onde em 4 deles se fez medições de concentração de CH_4 em profundidade, para avaliar a retenção e/ou oxidação de CH_4 ao longo da camada de cobertura final. O fluxo de CH_4 medido na camada do tipo barreira capilar (BAC) foi de $0,37 \text{ NI/m}^2 \cdot \text{h}$, na camada metanotrófica (MET) foi de $1,90 \text{ NI/m}^2 \cdot \text{h}$, e na camada convencional (CONV) foi de $4,97 \text{ NI/m}^2 \cdot \text{h}$. A BAC apresentou menores taxas de fluxo de CH_4 quando comparados com as outras duas configurações, devido a distribuição do biogás através da camada de pedras da base que funcionou como um dreno horizontal, equalizando as vazões de biogás e minimizando os picos de pressão e concentração. Foi verificado nos 3 tipos de cobertura, que a partir da base (contato solo/resíduo) até a superfície, a concentração volumétrica de CH_4 diminuiu, e que a relação CO_2/CH_4 aumentou, principalmente na camada do tipo metanotrófica, sendo um indicativo de que está ocorrendo a oxidação desse gás. Assim sendo, o estudo de camadas alternativas para minimizar o impacto do lançamento de biogás na atmosfera a partir das características físico-química dos materiais utilizados e das características construtivas, tem se mostrado importante, tendo em vista a necessidade de se reduzir as emissões de CH_4 , diminuindo o o impacto ambiental, principalmente em aterros de pequeno e médio porte disseminados no Brasil, onde a exploração econômica do biogás ainda é incipiente.

Palavras chaves: resíduos sólidos, aterro sanitário, biogás, camada de cobertura.

Introdução

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil vêm sendo dispostos em aterros sanitários por cerca de 27,7% dos municípios brasileiros, porém essa solução se concentra em grandes cidades, principalmente nas regiões de maior poder aquisitivo como Sul e Sudeste (IBGE, 2010). Esses resíduos quando lançados nos aterros sanitários, geram, através do processo de biodegradação anaeróbia, gases e líquidos que precisam ser monitorados e tratados e/ou aproveitados, de forma a equacionar problemas de poluição ambiental.

Os gases gerados pela biodegradação, constituídos basicamente por metano (CH_4), gás carbônico (CO_2) e gás sulfídrico (H_2S), são geralmente coletados em poços verticais e posteriormente queimados e lançados para atmosfera, ou algumas vezes lançados *in natura* na atmosfera. Os sistemas de coleta de gases e aproveitamento de biogás, geralmente estão associados a projetos de grande porte, não sendo a realidade dos aterros de pequeno porte no Brasil, onde a coleta é ineficiente eficiência, e o tratamento está associado basicamente a queima incontrolada dos gases. Spokas *et al.* (2006) mostraram em seus estudos de campo, que mais de 90% de recuperação de CH_4 pode ser conseguida com uma cobertura final adequada e um sistema de coleta de gás eficiente.

A camada de cobertura de aterros para RSU tem a função de isolar a massa de resíduos do ambiente externo, controlar a entrada ou saída de gases e limitar a infiltração de água, diminuindo assim a geração de lixiviados. A cobertura deve possuir uma série de características tais como baixa permeabilidade à água e ao ar e durabilidade ao longo do tempo.

No Brasil, não existe nenhuma exigência legal quanto ao tipo de material que a camada de cobertura deva ser constituída. A Norma Brasileira NBR 13.896/97, estabelece apenas “a necessidade do projeto e da implantação da cobertura final do aterro, que consiste de um sistema de impermeabilização superior”. Normalmente, as camadas de cobertura são construídas com materiais argilosos que são dispostos sobre os RSU para obtenção de uma camada com espessura variando de 50 a 100 cm adotando-se como parâmetro mínimo uma condutividade hidráulica do solo saturado na ordem de 10^{-8} cm/s. A execução dessas camadas exige uma fiscalização adequada dos materiais para que sejam atingidas as características especificadas, o que geralmente é negligenciado em aterros de pequeno porte. Nos últimos anos tem-se estudado camadas de cobertura alternativas, com particularidades construtivas, que levam em consideração propriedades geotécnicas dos solos, de modo a aperfeiçoar os custos na construção e atuar como elemento de redução de emissão de gases de efeito estufa.

De um modo geral, no Brasil são poucos os empreendimentos que aproveitam economicamente o CH_4 gerado no processo de biodegradação dos resíduos para geração de energia. Diversas configurações construtivas e materiais podem ser utilizados em camadas de cobertura de aterros sanitários de maneira a aperfeiçoar a captação dos gases por sistemas de drenagem de gases, ou retenção e/ou oxidação de CH_4 , para os casos onde a exploração não seja economicamente viável, minimizando-se assim a emissão para atmosfera. Dessa forma, várias denominações vêm sendo utilizadas para as camadas de cobertura, de acordo com o princípio físico, químico ou microbiológico que fundamenta o sistema.

As camadas de cobertura do tipo metanotróficas atuam como minimizadoras de emissão de CH_4 através da oxidação desse gás ao longo do perfil do solo. A atividade de bactérias metanotróficas em solos de coberturas de aterros é influenciada por fatores ambientais assim como pelas características do solo tais como temperatura, umidade, textura, pH e teor de nutrientes (Borjesson *et al.*, 2001). Estudos de laboratório já demonstraram taxas de oxidação em materiais de cobertura de aterros variando de 150 a 250 $\text{gCH}_4/\text{m}^2/\text{dia}$, sendo confirmado por Huber-Humer (2004) taxas de oxidação acima de 200 $\text{gCH}_4/\text{m}^2/\text{dia}$, em camadas compostas por um material grosseiro na base do material oxidativo, para uma distribuição mais uniforme do fluxo de gás na camada superior.

Outro tipo de configuração de camada de cobertura utiliza as características geotécnicas do solo como uma barreira ou parte de uma camada composta, para evitar infiltração da água na superfície dos aterros e ao mesmo tempo impedir a saída de gases. Essa alternativa também é

comumente denominada de camada evapotranspirativa ou barreira capilar (Berger *et al.*, 2005, Seheur *et al.*, 2008). A barreira capilar consiste de uma fina camada de material (camada capilar) que se sobrepõe a uma camada de material mais grosso (bloco capilar), sendo seu funcionamento baseado no efeito das forças capilares e no princípio do fluxo em solos não saturados em materiais com diferentes permeabilidades.

Este trabalho tem como objetivo apresentar as emissões de CH₄ medidas em três configurações diferentes de camada de cobertura implantada em uma célula experimental de aterro de RSU, localizada no Aterro da Muribeca, Recife-PE, Brasil. Além disso, são analisadas as variações de concentrações de CH₄ e CO₂ desde a interface solo/resíduo até a superfície de cada camada de cobertura, utilizando a variação da relação CO₂/CH₄ como indicador de oxidação.

Metodologia

Esse estudo foi realizado na célula experimental localizada no aterro da Muribeca, no município de Jaboatão dos Guararapes-PE, Brasil. Essa célula foi preenchida entre junho de 2007 a fevereiro de 2008, em uma área 65m x 85m e preenchida no período de junho de 2007 a fevereiro de 2008 com RSU, perfazendo uma altura de 9m e correspondendo a 36.659 toneladas de resíduos.

Características das camadas de cobertura

A camada de cobertura final da célula experimental foi iniciada após a geometrização dos resíduos, sendo executada logo após o término do preenchimento dos resíduos, com materiais disponíveis em uma jazida dentro da própria área do aterro. A Figura 1 apresenta as características de cada camada, com uma disposição esquemática em planta.

As camadas de cobertura apresentam as seguintes características construtivas:

- a) Camada metanotrófica (MET): camada composta por 30 cm de argila compactada sobreposta com mistura de 50% de solo mais 50% de composto orgânico da unidade de compostagem existente no aterro, (em volume), com espessura variando de 40 a 75 cm;
- b) Barreira capilar (BAC): camada composta por 20 cm de pedra granítica do tipo rachinha (com diâmetro médio de 10 cm) sobreposta com argila compactada com espessura variando de 45 a 60 cm. Na interface entre a argila e a camada de pedra, foi utilizado geotêxtil tipo tecido não tecido ou agulhado;
- c) Camada convencional (CONV): argila compactada, com espessura variando de 50 a 90 cm.

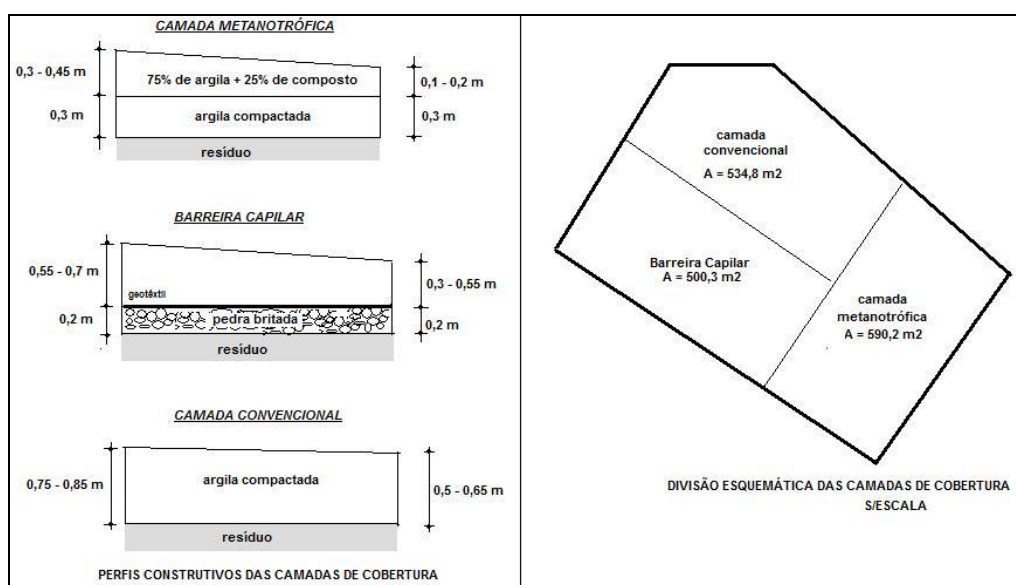


Figura 1. Perfis construtivos e divisão esquemática das camadas de cobertura

Determinação do fluxo de biogás

A metodologia empregada para analisar as emissões de CH_4 foi dividida em ensaios de campo e laboratório. Inicialmente foram realizados os ensaios de laboratório para caracterização dos materiais utilizados nas camadas de cobertura: granulometria completa, peso específico dos grãos, Limites de consistência, Compactação e permeabilidade à água, todos normatizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Em campo foram medidas as emissões a partir da técnica de placa de fluxo estática, assim como foram medidas as concentrações dos gases, em profundidade, com coleta de material para determinação das condições de campo no período de setembro a dezembro de 2008. O ensaio da placa de fluxo estática seguiu a metodologia descrita por Maciel (2003). Uma placa de aço de área útil de 0,4 m x 0,4 m e altura útil de 0,08 m é cravada cuidadosamente no solo (Figura 2) e a partir do instante inicial são medidas as concentrações dos gases CH_4 , CO_2 , O_2 e H_2S através de um analisador portátil de gases, a temperatura interna (entre a placa e a camada de cobertura), a temperatura ambiente, a pressão interna e a pressão atmosférica a cada leitura de gás, com periodicidade de 5 a 10 minutos, durante um período de 30 a 60 minutos. O fluxo de CH_4 e CO_2 é determinado pela inclinação inicial da curva da massa de biogás em função do tempo. Todos os dados de taxas de fluxo e coeficiente linear de determinação (R^2) foram determinados para os testes realizados nas três coberturas experimentais. Ao retirar a placa de fluxo, é moldado um anel com amostra do solo local para a determinação da densidade aparente do solo úmido e umidade de campo.

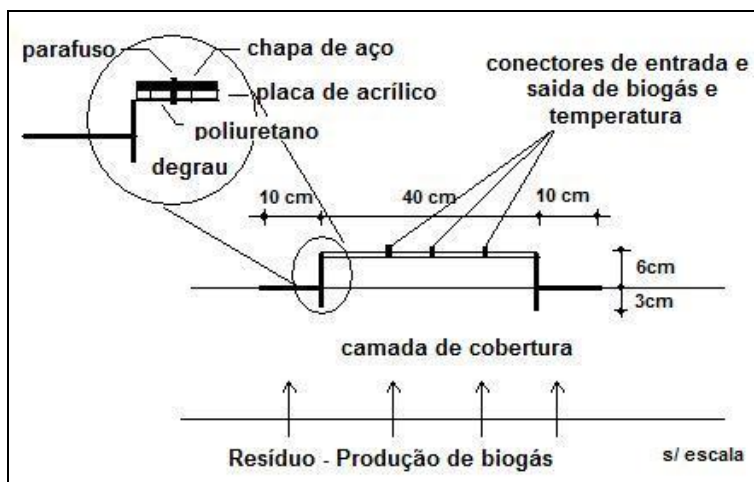


Figura 2: Placa de fluxo estática para medição de emissão de biogás (Adaptada de Maciel, 2009)

Medições de concentração de biogás, temperatura, umidade, teor de matéria orgânica e pH em profundidade

Em quatro ensaios de fluxo de CH_4 foi feito no mesmo local, o ensaio em profundidade, através da cravação de um tubo de ferro de 40 mm de diâmetro, a cada 0,1 m de profundidade, até o contato com os resíduos. Em cada profundidade são medidas as concentrações instantâneas dos gases e a temperatura do solo, e coletadas amostras para determinação em laboratório de pH, umidade e sólidos voláteis conforme EMBRAPA (1997).

Resultados e discussões

Condições climatológicas

Durante o presente estudo a pressão barométrica, temperatura e pluviometria variou como mostrado na Tabela 01. As flutuações de pressão barométrica e precipitação têm relação direta com as emissões de gases na camada de cobertura (Maciel, 2003), sendo esses fatores alheios à operação do aterro. Boeckx *et al.* (1996) mostraram, em estudos de campo e laboratório, que há uma alta variabilidade de emissão de CH_4 em camadas de cobertura, porém pode-se observar um padrão sazonal, sendo as emissões maiores durante os meses mais quentes. Esse estudo foi realizado no final da estação chuvosa (setembro e outubro) e início da estação com maiores temperaturas que é o verão no nordeste do Brasil (novembro e dezembro).

Tabela 1. Dados climatológicos da área de estudo

Mês	Pressão barométrica (kPa)		Temperatura (°C)		Precipitação (mm)
	Mín	Máx	Mín	Máx	
Setembro/2008	101,2	101,7	22,5	31,0	45,25
Outubro/2008	101,1	101,6	22,0	31,5	42,25
Novembro/2008	100,9	101,5	22,0	32,0	14,25
Dezembro/2008	100,8	101,5	22,5	32,5	22,75

Emissões de metano e características do solo

A emissão superficial média de CH₄ no período de setembro a dezembro de 2008 para 8 ensaios de placa de fluxo estática, em cada tipo de cobertura, as características do solo em profundidade medidos em 4 ensaios são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2. Emissões de CH₄ e características do solo

Camada	Fluxo de CH ₄ (NI/h.m ²)	GC (%)	Teor de Umidade (%)	pH	T	Sólidos Voláteis (%)
MET	1,90	76,8	23,3 ± 10,9	7,45 ± 0,55	36,1 ± 5,1	16,3 ± 4,5
BAC	0,37	86,7	11,5 ± 5,0	6,08 ± 0,86	34,4 ± 1,9	7,33 ± 1,5
CONV	4,97	83,9	15,0 ± 2,1	5,74 ± 1,18	33,2 ± 2,0	7,43 ± 1,1

Nesse período verificou-se que as camadas metanotrófica e barreira capilar apresentaram menores emissões e menor faixa de variação de CH₄ do que a camada convencional, nos 8 ensaios realizados. Essas camadas também apresentaram crescimento espontâneo de vegetação, diferentemente da camada convencional que permaneceu sem vegetação nesse período.

A MET apresentou maior capacidade de retenção de umidade ao longo de todo perfil, mesmo no período seco, reduzindo as emissões de CH₄, como também foi comprovado por Stern *et al.* (2007). Além disso, o solo dessa camada apresentou um pH acima da neutralidade e um teor de sólidos voláteis duas vezes superior ao solo das camadas CONV e BAC. Essas características são decorrentes da adição de composto que altera as propriedades físico-químicas dos materiais, propiciando ambiente favorável para crescimento de micro-organismos metanotróficos, como foi observado por Huber-Humer e Lechner (2001), Cabral *et al.* (2007) e Jugnia *et al.* (2008).

Com relação à BAC, a menor emissão de CH₄ e a menor dispersão dos resultados estão associadas à distribuição do biogás através da camada de pedras na base, que funcionou como um dreno horizontal, equalizando as vazões de biogás e minimizando os picos de pressão e

concentração ao longo da cobertura, além de uma maior compactação do solo, que proporcionou a retenção do biogás.

A Figura 3 mostra a variação média na concentração de biogás, da temperatura e a variação na relação CO_2/CH_4 desde a base até 0,1 m da superfície.

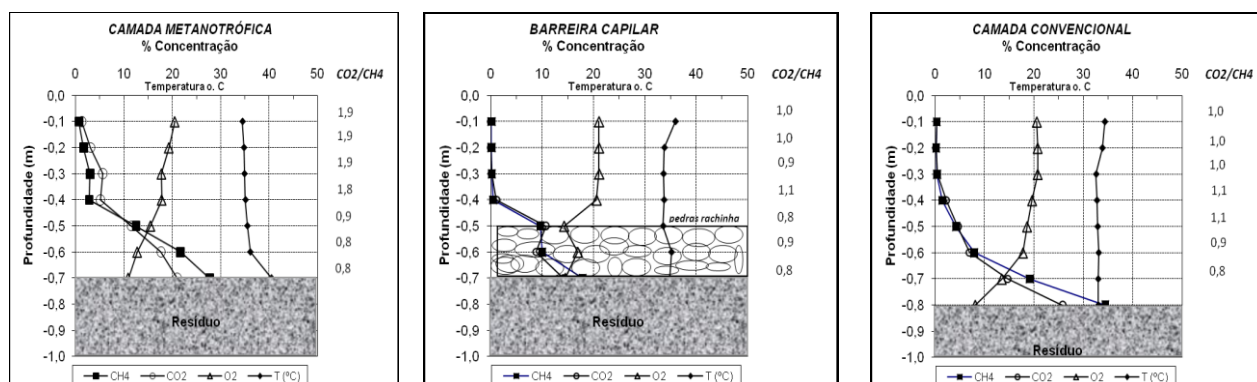


Figura 3. Perfis de concentração de biogás e de temperatura nas três camadas de cobertura

De acordo com os perfis em profundidade mostrados na Figura 3, observa-se uma característica típica de diminuição de concentração desde a base até a superfície em todas as três camadas, no entanto, a variação na relação CO_2/CH_4 é mais significativa na camada metanotrófica (de 0,8 para 1,9) o que sugere maior probabilidade oxidação de CH_4 nessa camada pela transformação do CH_4 em CO_2 através da reação de oxidação. Embora essa camada apresente maior porosidade, a presença de oxigênio, em conjunto com fatores que influenciam no crescimento de bactérias metanotróficas, favoreceu reações de oxidação, que também pode ser observada em função da maior variação de temperatura média ao longo do perfil do solo ($36,1 \pm 5,1$). Todos os fatores que favoreceram a oxidação do CH_4 são mais evidenciados na camada metanotrófica, justificando-se, portanto, menores emissões nesse tipo de camada, em relação a uma camada convencional de solo compactado.

A camada convencional apresentou emissões de CH_4 2,5 vezes superior à camada metanotrófica e de 12 vezes superior à barreira capilar, no período monitorado. A pequena variação no teor de umidade ao longo da espessura e maior concentração de biogás na base, fez com que houvesse maiores emissões nessa camada, além das condições desfavoráveis para o crescimento de micro-organismos metanotróficos tais como baixo pH, teor de matéria orgânica do solo, que não favoreceram reações de oxidação, o que pode ser observado também pela menor variação na temperatura ao longo do perfil do solo. Bogner *et al.* (1995) e Fourrie e Morris (2004) também mediram emissões de CH_4 de mesma magnitude que as apresentadas pela camada convencional, em solos de cobertura sem vegetação. A textura do solo, espessura da camada e condições de compactação são fatores geralmente atribuídos para maiores emissões de biogás.

Conclusões

O CH_4 é o principal gás de efeito estufa gerado em aterros sanitários e geralmente é emitido para atmosfera através de sistemas de coleta sem tratamento ou do fluxo nas camadas de coberturas. Em municípios de pequeno e médio porte a relação custo/benefício para exploração econômica desse gás é baixa o que leva a maioria dos aterros a lançarem, sem nenhum tratamento ou através da queima simples, esses gases para atmosfera. Faz-se necessário a adoção de tecnologias que reduzam as emissões antropogênicas, tendo em vista a disseminação de aterros de pequeno e médio porte em nosso país e no mundo.

As normas brasileiras não dão muita ênfase aos aspectos técnicos para as camadas de cobertura final de aterros sanitários, mencionando apenas em linhas gerais algumas características a serem observadas, sem entrar no mérito do dimensionamento e especificações técnicas dos materiais. Nesse trabalho foram apresentados os resultados iniciais das análises de fluxo de CH_4 de três perfis de camadas de cobertura de uma célula experimental localizada no Aterro da Muribeca, em Jaboatão dos Guararapes-PE, através de ensaios de campo e laboratório.

A camada do tipo barreira capilar apresentou menores fluxos de CH_4 quando comparada com outras duas configurações, provavelmente devido as suas características construtivas e menores variações das características físico-químicas ao longo do perfil do solo. O fluxo de CH_4 medido nessa camada foi de $0,37 \text{ NI/m}^2\cdot\text{h}$, sendo medidos $1,90 \text{ NI/m}^2\cdot\text{h}$ na camada do tipo metanotrófica e $4,97 \text{ NI/m}^2\cdot\text{h}$ na camada convencional.

Nesse estudo verificou-se que a oxidação do CH_4 pode ter sido mais evidente na camada metanotrófica devido essa ter apresentado fatores favoráveis atividade microbológica. No caso das camadas de cobertura estudadas nesse trabalho, a combinação de fatores tais como a presença de um material de granulometria grosseira (pedra rachinha) na base do solo, favorecendo menor gradiente de concentração, e conseqüentemente de fluxo de biogás, aliado à uma camada que propicie crescimento de vegetação pode ser uma alternativa viável para redução de gases de efeito estufa em aterros de resíduos sólidos.

Dessa forma, o estudo de camadas alternativas às camadas convencionais de solo compactado tem como objetivo encontrar soluções para minimizar o lançamento de biogás na atmosfera. Essas camadas se apresentam como uma forma promissora de reduzir emissões de CH_4 , a partir das características físico-químicas dos materiais utilizados e das características construtivas e dessa forma se constituiu em uma alternativa importante para os projetos de aterros de pequeno e médio porte, que podem apresentar menor impacto ambiental e ganhos econômicos em função da redução das emissões de carbono.

Agradecimentos: Os autores agradecem as instituições financiadoras desse projeto (CHESF, CAPES E CNPQ) e a EMLURB pela colaboração na execução da célula experimental.

Referencias bibliográficas

- Berger, J.; Forne's, L.V.; Ott, C.; Jager, J.; Wawra, B.; Zanke, U. (2005) Methane oxidation in a landfill cover with capillary barrier. *Waste Management* **25**(4), 369–373.
- Boeckx, P.; vanCleemput, O.; Villaralvo, I. (1996) Methane emission from a landfill and the methane oxidizing capacity of its covering soil. *Soil Biology & Biochemistry* **28**(10/11), 1397-1405.
- Bogner, J.E.; Spokas, K.A.; Burton, E.A.; Sweeney, R.; Corona, V. (1995) Landfills as atmospheric methane sources and sinks. *Chemosphere*, **31**(9), 4119–4130.
- Borjesson, G., Chanton, J., Svensson, B.H., (2001). Methane oxidation in two swedish landfill covers measured with carbon-13 to carbon-12 isotope ratios. *Journal of Environmental Quality* **30**(2) 369–376.
- Cabral, A.R.; Arteaga, K.; Rannaud, D.; Aït-Benichou, S.; Pouët, M.F.; Allaire, S.; Jugnia L-B.; Greer, C. W. (2007) Analysis of methane oxidation and dynamics of methanotrophs within a passive methane oxidation barrier. In: *Proceedings Sardinia 2007*, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.
- EMBRAPA (1997). Manual de métodos de análises de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, Ministerio da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212p.
- Fourie, A.B.; Morris, J.W. F. (2004) Measured gas emissions from four landfills in South Africa and some implications for landfill design and methane recovery in semi-arid climates. *Waste Management Resources*, **22**(6), 440–453
- Humer-Humer, M.; Lechner, P. (2001) Microbial Methane Oxidation for the Reduction of Landfill Gas Emissions. *Journal of Solid Waste Technology and Management*, **27**(3/4), 146-151.
- Huber-Humer, M. (2004) Abatement of landfill methane emissions by microbial oxidation in biocovers made of compost. PhD Thesis, University of Natural Resources and Applied Life Sciences (BOKU), Vienna, 279 pp
- IBGE (2010) Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br> > Acesso em: 10 set. 2010.
- Jugnia, L.-B.; Cabral, A. R.; Greer, C. W. (2008) Biotic methane oxidation within an instrumented experimental landfill cover. *Ecological Engineering*. **33**(2), 102–109
- Maciel, F. J. (2003) Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Recife-PE. 173 p.
- Maciel, F. J. (2009) Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Recife-PE. 354 p.
- Seheum, M.; Nam, K.; Kim, J. Y.; Hwan, S.K.; Chung, M (2008) Effectiveness of compacted soil liner as a gas barrier layer in the landfill final cover system. *Waste Management*, **28**(10), 1909-1914.
- Spokas, K.; Bogner, J.; Chanton, J.P.; Morcet, M.; Aran, C.; Graff, C.; Moreau-Le Golvan, Y.; Hebe, I. (2006) Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems? *Waste Management*, **26**(5), 516–525.
- Stern, J.C.; Chanton, J.; Abichou, T.; Powelson, D.; Yuan, L.; Escoriza, S.; Bogner, J., (2007). Use of a biologically active cover to reduce landfill methane emissions and enhance methane oxidation. *Waste Management* **27**(9), 1248–1258.